

# 断层破碎带岩溶大断面隧道坍塌事故处理

王峥峥<sup>1</sup>, 孙铁成<sup>2</sup>, 张胜林<sup>3</sup>, 李 斌<sup>4</sup>

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 大连 116024; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043;  
3. 贵州桥梁建设集团有限责任公司, 贵阳 550001; 4. 中铁十三局集团有限公司, 天津 300308)

**摘 要:** 针对隧道穿越断层破碎带溶洞时出现坍塌及初期支护变形事故, 综合分析了坍塌及变形区的规模及现场揭露的地质情况, 结合洞内施工条件及施工情况, 对隧道坍塌及变形区进行工字钢临时支撑及封闭注浆后, 提出“超前管棚+小导管注浆”处理方案, 并在处理段增设监测断面, 通过监控量测判断围岩的稳定状况及坍塌变形处理效果。量测结果表明, 坍塌变形段围岩处理后在一定时间内达到稳定, 说明采用“超前管棚+小导管注浆”方案处理断层破碎带岩溶隧道坍塌变形效果良好, 对类似工程事故处理有一定的借鉴作用。

**关键词:** 隧道工程; 断层破碎带; 溶洞; 隧道坍塌; 超前管棚; 小导管注浆

中图分类号: TU 443

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)10-1494-05

## Collapse Treatment of Faulted Karst Cave Tunnel

WANG Zheng-zheng<sup>1</sup>, SUN Tie-cheng<sup>2</sup>, ZHANG Sheng-lin<sup>3</sup>, LI Bin<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;  
3. Guizhou Bridge Construction Group Co., Ltd., Guiyang 550001, China;  
4. China Railway 13th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

**Abstract:** To aim at analyzing collapse of a tunnel during construction in faulted karst cave, unfavorable geological condition, continuous rainstorm and inaccurate geological survey were discussed and according to in-situ survey, the method of advanced pipe with ductile grouting was put up, and applied to collapse treatment. Furthermore, monitoring and measurement of grouping zone was conducted during tunnel construction. The in-situ monitoring data show that the method of advanced pipe with ductile grouting is effective for temporary support requirements in tunnel collapse treatment.

**Key words:** tunnelling engineering; fault; karst cave; tunnel collapse; advanced pipe; ductile grouting

## 0 引言

大断面隧道坍塌及初期支护变形是隧道施工中较为常见的一种事故, 不仅会延误工期、提高工程造价, 甚至会造成人员伤亡。如果处治不当, 还可能影响后续施工, 遗留工程质量隐患等问题<sup>[1-4]</sup>。因此, 分析隧道事故发生原因, 采取有效措施进行处治是隧道设计和施工中面临的重要课题。

对于穿越溶洞或断层隧道施工事故的分析和处理, 国内外工程实例分析较多<sup>[5-10]</sup>, 但对于断层破碎带岩溶隧道坍塌及变形事故处理的研究, 则未见报道。

为有效处理断层破碎带岩溶隧道坍塌及变形事故, 结合某在建隧道现场情况, 从不良地质、雨水侵蚀作用以及前期地质勘察欠准确等方面分析事故发生原因。综合分析坍塌及变形区的规模及现场揭露

收稿日期: 2012-07-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51108056)。

作者简介: 王峥峥, 男, 博士后, 讲师, 主要从事隧道及地下工程等方面的研究, E-mail: wangzhengzheng@dlut.edu.cn.

的地质情况,结合洞内施工条件及施工情况,对隧道坍塌及变形区进行工字钢临时支撑及封闭注浆后,提出“超前管棚+小导管注浆”处理方案,并在处理段增设监测断面,通过监控量测判断围岩的稳定状况及坍塌变形处理效果。

## 1 隧道事故发生经过及临时处理措施

### 1.1 工程概况

该隧道是韶(关)一赣(州)高速公路的关键性控制工程之一,位于广东省境内,设计为上下行分离的双洞隧道。隧址区属低山丘陵地貌区,山体由石炭系芙蓉山组砂岩及石磴子组灰岩、炭

质灰岩及白云质灰岩构成。地形起伏较大,局部切割较深,形成陡峭山坡。隧道进口端地形较陡,自然坡度角在 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ,坡面植被不发育,沿坡面冲刷侵蚀现象较严重;隧道出口端坡度 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。洞身段地形较陡,隧道轴线与山脊大致平行,山体北侧植被较发育,水土流失较严重。隧址区发育 F1、F2、F13 断层破碎带,且相互交结,岩体破碎,围岩级别降低;同时由于构造作用,岩体节理、裂隙发育,溶蚀强烈,断层附近岩溶发育,而 F1、F2 本身为导水断层,与地表落水洞有较好的连通性,雨季对施工有较大的影响。隧道地质纵断面图见图 1。

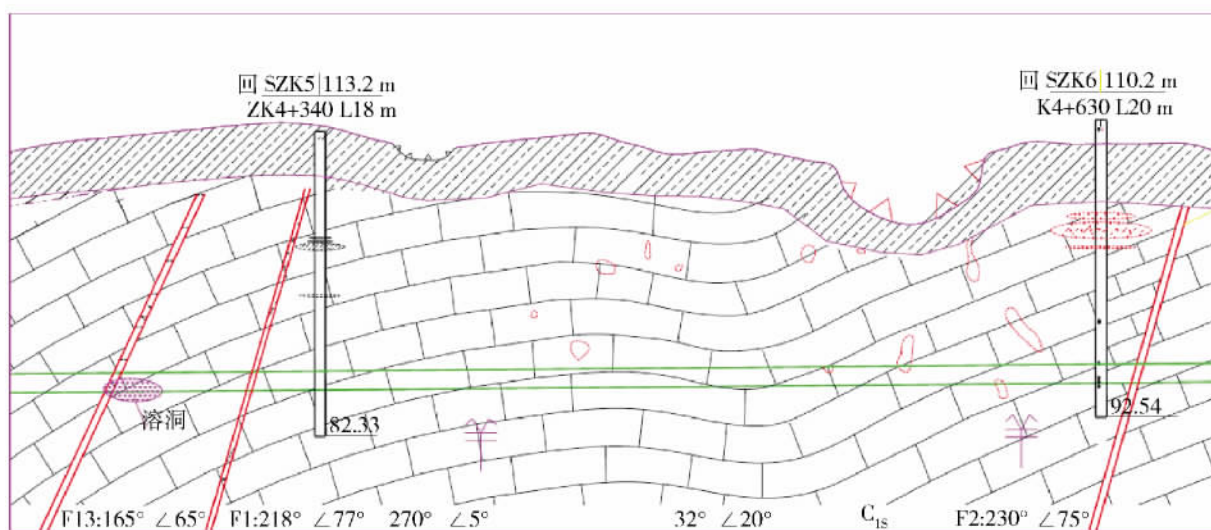


图 1 隧道地质纵断面图

Fig. 1 Profile of tunnel geology

隧址区溶洞主要发育在洞身 K4+340—K4+630 左、右线地段,在 K3+005 及 K4+200 附近地段有零星分布,主要发育标高 144.7~168.0 m 及 108.7~131.6 m,多数溶洞充填硬塑状黏性土夹碎砾石,极少数为空溶洞。标高 108.7~131.6 m 的溶洞正好在洞身范围或距洞顶 10~20 m,对施工有较大影响。

ZK4+035—ZK4+232 段原设计为Ⅲ级围岩,围岩为弱风化灰岩,局部夹有强风化砂岩,裂隙较发育,局部岩溶发育,岩体呈碎裂状镶嵌结构,围岩稳定性较好。但施工开挖揭示围岩为富水性纯黏土夹块石及纯黏土地质、溶蚀强烈。变更调整支护参数为:ZK4+035—ZK4+072 段调整为Ⅳ级,ZK4+072—ZK4+082 段调整为Ⅴ级,ZK4+082—ZK4+096 段调整为Ⅴ加强支护。K4+096—ZK4+108.7 段已发现溶洞按设计方案处理,即先清除坍塌充填

物,初喷封闭临空面,再锚喷支护,衬砌后回填处理。其中 ZK4+065—ZK4+068 段溶洞周边为富水性黏土夹石,裂隙发育填充黏土;ZK4+068—ZK4+076.5 段溶洞周边及后壁以黏土为主夹有大小不同的块石。

### 1.2 事故发生经过及临时处理措施

2009 年 2 月 7 日经监测发现 ZK4+072—ZK4+076 段拱顶靠右侧初期支护有变形,并能听见物体掉落撞击初期支护拱部的声音,拱顶、拱腰型钢变形扭曲,施工单位当即停止掌子面施工,并对掌子面喷射混凝土封闭。继续观测,变形继续加快,并向掌子面延伸。

施工单位于 2009 年 2 月 8 日开始采用 $\phi 50$  mm 小导管对 ZK4+065—ZK4+096 段进行注浆加固,并于 2 月 9 日对该段施作环向型钢支撑临时加固(如图 2 所示)。2 月 10 日留有核心土的掌子面发

生坍塌,并于当日坍塌体堆满掌子面。2月11日施作了两排竖向型钢支撑(如图3所示),并停工观测。2月12日观测发现变形继续加快,现场采取警戒措施,并撤离机械设备和工作人员。2月13日凌晨5时30分坍塌继续延伸至ZK4+071,造成ZK4+071—ZK4+096段初期支护破坏、全断面被坍塌体封堵。

至2月15日坍塌继续延伸至ZK4+068,坍塌长度约为28m,ZK4+068—ZK4+065段初期支护变形。隧道塌方及型钢临时支撑如图4所示。



图2 型钢环向临时支撑

Fig.2 Ring support of profiled bar



图3 型钢竖向临时支撑

Fig.3 Vertical support of profiled bar

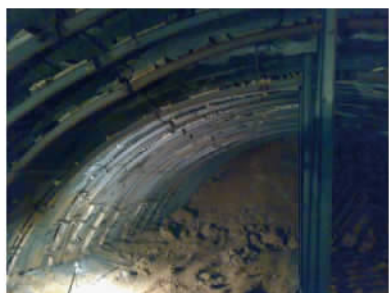


图4 隧道塌方及临时处理措施

Fig.4 Temporary reinforcement measure of collapsed tunnel

### 1.3 隧道事故发生原因分析

1) 溶洞及断层交叉影响导致隧道围岩失稳  
隧道范围内地质构造复杂、节理裂隙发育、溶蚀

强烈,坍塌体揭示岩体为富水性纯黏土夹石(坍塌石块直径大约0.5~3.0m),呈泥石混杂状、松散结构,自稳能力差。

隧道坍塌及初期支护变形均处于断层破碎带和溶蚀地段,断层破碎带和溶洞填充物的失稳引起隧道围岩变形、坍塌。图5为坍塌段揭示溶洞,溶洞高约9.5m,宽约8m。



图5 坍塌段溶洞

Fig.5 Collapse of the tunnel crossing karst cave

### 2) 雨水侵蚀作用

隧址左、右侧位于3条冲沟,并且地表无植被。该段施工期间连日降雨(1月26日—1月31日小到中雨持续不断),地表水渗入隧道围岩,使黏土含水量增加,降低了岩体的自稳能力。

### 3) 前期地质勘察欠准确

ZK4+035—ZK4+232段原设计为Ⅲ级围岩,围岩为弱风化灰岩,局部夹有强风化砂岩,裂隙较发育,局部岩溶发育,岩体呈碎裂状镶嵌结构,围岩稳定性较好。但施工开挖揭示围岩为富水性纯黏土夹块石及纯黏土地质,溶蚀强烈。

## 2 隧道坍塌处理

### 2.1 坍塌处理方案

综合分析坍塌及变形区的规模及现场揭露的地质情况,结合洞内施工条件及施工情况,对隧道坍塌及变形区进行工字钢临时支撑及封闭注浆后,提出“超前管棚+小导管注浆”处理方案,如图6所示,充分利用注浆的加固效应和钢管的梁效应。

### 2.2 现场施工处理

综合分析坍塌及变形区的规模及现场揭露的地质情况,结合洞内施工条件及施工情况,提出采用“超前管棚+小导管注浆”的处理方案,充分利用钢管的梁效应和注浆的加固效应。具体施工工艺如下:

#### 1) 注浆加固:超前管棚+小导管注浆

在ZK4+071—ZK4+101段,拱部120°范围内施作 $\phi 108$  mm管棚,长度30m,环向间距50cm,外

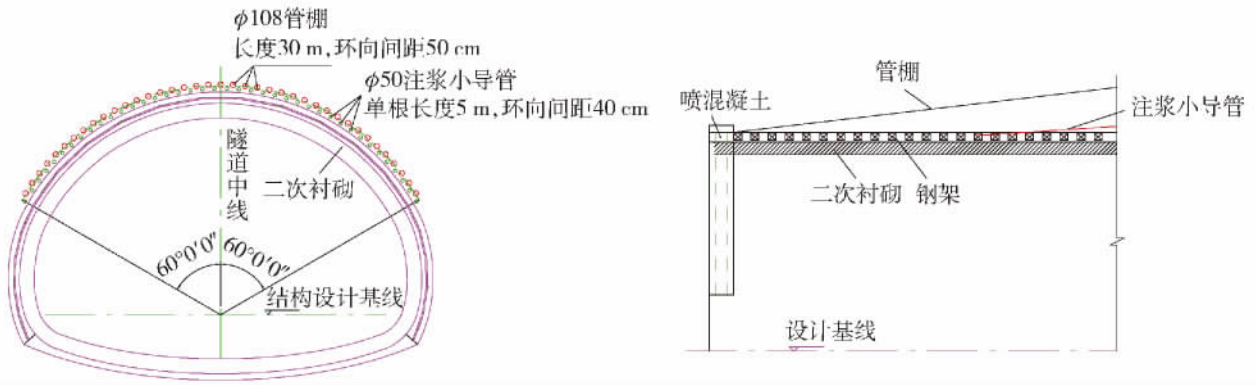


图 6 “超前管棚 + 小导管注浆”加固方案

Fig. 6 Reinforcement scheme of advanced pipe with ductule grouting

插角 15°~20°。管棚采取分段安装,每段 4~6 m,丝扣连接。注浆材料为水灰比 1:1 纯水泥浆,注浆压力 0.5~1.0 MPa。管棚每延米注浆量不超过 0.3 m<sup>3</sup>,管棚施工应采用专用的管棚设备。

在 ZK4 + 071—ZK4 + 101 段,拱部 120° 范围内施作 φ50 mm 小导管,单根长 5 m,环向间距 40 cm,外插角 7°~10°,单根小导管注浆量不超过 0.4 m<sup>3</sup>。小导管搭接长度 1.5 m。

为了确保注浆质量,避免浆液直接进入坍塌空腔内,应进行注浆压力及注浆量控制。具体工艺如下:分 2 次注浆,管棚第 1 次注浆 0.2 m<sup>3</sup>/延米,第 2 次注浆 0.1 m<sup>3</sup>/延米;小导管第 1 次注浆 0.25 m<sup>3</sup>/根,第 2 次注浆 0.15 m<sup>3</sup>/根,注浆压力 0.5~1.0 MPa。第 1 次注浆后,应用风枪冲导管或管棚,避免第 1 次注浆堵塞导管或管棚壁上的注浆孔,不对相邻导管或管棚实施连续注浆。注浆量或注浆压力达到要求后可停止注浆,若发现注浆异常,应立即停止注浆。注浆过程中应做好 2 次注浆时间、注浆压力、注浆量等记录。

2) 开挖

采用双侧壁导坑法开挖,每次进尺不超过 50 cm。I 20b 钢架间距 40 cm,φ8 mm 钢筋网 20 cm × 20 cm,喷射混凝土 26 cm,预留变形量 20 cm。施工中应确保钢架位于竖向平面内,钢架脚基础稳定,钢架节点完好,保证施工质量。为控制钢架基础发生沉降变形,钢架脚采用 25a 槽钢垫底,长度 40 cm。

3) 初期支护

支护参数: I20b 钢架间距 40 cm,φ8 mm 钢筋网 20 cm × 20 cm,喷砼 26 cm,预留变形量 20 cm。施工中应确保钢架位于竖向平面内,钢架脚基础稳定,钢架节点完好,保证施工质量。为控制钢架基础发生

沉降变形,钢架脚采用 25a 槽钢垫底,长度 40 cm。

4) 地表裂缝及地表冲沟处理

加强地表裂缝的监测,对裂缝带采用黏土置换,厚度 50 cm。对该段地表冲沟采用 M7.5 浆砌片石进行渠化处理,渠化尺寸参照洞口改沟设计图,可根据实际冲沟宽度调整横向尺寸。处理段落为冲沟源头至隧道右线隧道中线右侧 20 m 范围。

通过上述处理,隧道顺利通过了坍塌及变形地段。

3 处理效果评估

为了掌握塌方区处理后围岩的稳定性及反馈塌方处理效果,按照现场实际情况,在里程分别为 ZK4 + 071、ZK4 + 071 及 ZK4 + 071 处增设了围岩变形量测断面,量测隧道拱顶下沉及周边位移。各测点布置如图 7 所示。

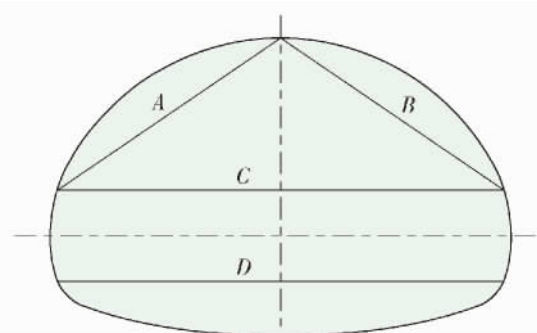


图 7 监控量测测点布置示意图

Fig. 7 Layout of monitoring points in tunnel

图 8 为隧道坍塌及变形段采用“超前管棚 + 小导管注浆”方案处理后围岩位移随时间的变化规律。从图 8 可以看出,处理初期围岩累积变形量(Δ)较大,随后很快趋于稳定。由此表明,坍塌及变形处理达到了预期的目的。



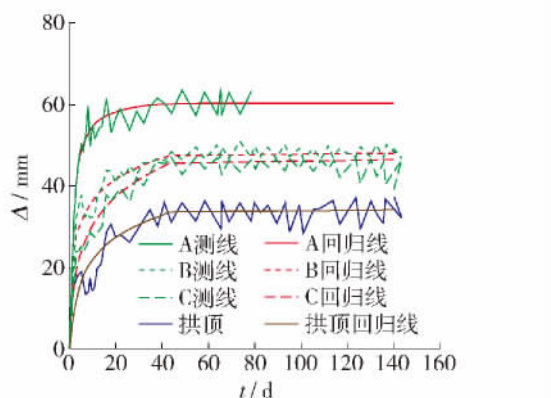


图8 现场监控量测结果

Fig. 8 In-situ monitoring results

#### 4 结论

1) 结合工程具体情况,指出不良地质、雨水侵蚀作用以及前期地质勘察欠准确是隧道坍塌及变形事故发生的原因。

2) 提出采用“超前管棚+小导管注浆”措施处理断层破碎带内岩溶隧道坍塌及变形,该方法充分利用注浆的加固效应和钢管的梁效应。

3) 采用“超前管棚+小导管注浆”方案对断层破碎带内岩溶隧道坍塌及变形处理后,顺利通过了坍塌及变形地段。并通过现场监控量测结果评价了“超前管棚+小导管注浆”方案的效果,对类似工程事故处理有一定的借鉴作用。

#### 参考文献:

- [1] 陈秋南,赵明华,周国华,等. 复杂层状岩层隧道塌方原因分析及加固后信息化施工技术[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 650-653.  
CHEN Qiu-nan, ZHAO Ming-hua, ZHOU Guo-hua, et al. Cause analysis of complex layered rock tunnel collapse and information construction technology after consolidation[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 650-653. (in Chinese)
- [2] 李志勇,晏莉,阳军生. 浅埋偏压连拱隧道中导洞塌方数值分析与处理[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 102-106.  
LI Zhi-yong, YAN Li, YANG Jun-sheng. Numerical analysis and treatment of a collapsed middle drift for shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 102-106. (in Chinese)
- [3] 李晓红. 隧道新奥法及其监控量测[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[4] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

[5] 李术才,薛翊国,张庆松,等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1297-1306.

LI Shu-cai, XUE Yi-guo, ZHANG Qing-song, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1297-1306. (in Chinese)

[6] 张民庆,黄鸿建,田四明. 岩溶隧道安全设计、施工与管理[J]. 铁道工程学报, 2007(5): 75-85.

ZHANG Min-qing, HUANG Hong-jian, TIAN Si-ming. Safe design, construction and management of karst tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(5): 75-85. (in Chinese)

[7] 谭代明,漆泰岳,莫阳春. 侧部岩溶隧道围岩稳定性数值分析与研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 3497-3503.

TAN Dai-ming, QI Tai-yue, MO Yang-chun. Numerical analysis and research on surrounding rock stability of lateral karst cave tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 3497-3503. (in Chinese)

[8] 尚寒春. 华蓥山隧道东口岩溶分析及溶洞处理[J]. 铁道工程学报, 2007, (8): 58-61.

SHANG Han-chun. Analyses of karst at eastern portal of huaying mountain tunnel and treatment of karst cave [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, (8): 58-61. (in Chinese)

[9] 林本涛. 干溪沟隧道岩溶整治分析[J]. 铁道工程学报, 2006, (7): 54-58.

LIN Ben-tao. Analysis of treatment of karst in Ganxigou tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, (7): 54-58. (in Chinese)

[10] 赵明阶,敖建华,刘绪华. 岩溶尺寸对隧道围岩稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 213-217.

ZHAO Ming-jie, AO Jian-hua, LIU Xu-hua, et al. Model testing research on influence of karst cave size on stability of surrounding rockmasses during tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 213-217. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)